

Wiesława Urzędowska, Zbigniew Stępień  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Oddziaływanie paliwa na zmiany właściwości użytkowych oleju smarowego w silniku z ZI typu *FlexFuel*

### Wstęp

Właściwości fizykochemiczne i użytkowe benzyn o podwyższonym udziale etanolu są w dużym stopniu odmienne od tych, jakimi charakteryzują się tradycyjne benzyny, zawierające, zgodnie z normą PN-EN 228, do 5% (*V/V*) biokomponentów. Dlatego też z punktu widzenia oceny właściwości użytkowo-eksploatacyjnych paliwo takie należy rozpatrywać jako zupełnie inne od standardowej benzyny silnikowej. Różnice pomiędzy przedmiotowymi paliwami narastają wraz ze zwiększającym się udziałem etanolu w benzynie i obejmują między innymi:

- obniżanie się wartości opałowej biopaliwa,
- szybko wzrastające ciepło odparowania biopaliwa,
- nieaddytywny przyrost prężności par biopaliwa,
- wzrost liczb oktanowych (LOB i LOM) biopaliw,
- obniżanie temperatury płomienia podczas procesów spalania mieszanek zawierających coraz większy udział etanolu,
- pogarszanie właściwości smarnych biopaliw,

- wysoką higroskopijność etanolu, a zatem łatwość pochłaniania wody, przyczyniającej się między innymi do intensyfikacji procesów korozyjnych elementów silnika,
- możliwość wymywania przez alkohol (jako rozpuszczalnik) osadów z elementów oraz części składowych układu paliwowego i przenoszenia ich do filtrów oraz podzespołów układów wtrysku paliwa,
- możliwość wystąpienia niekompatybilności z niektórymi materiałami konstrukcyjnymi (uszczelnienia, elementy układów paliwowych, jak: zbiorniki paliwa, przewody paliwowe, elementy wtryskiwaczy i pomp paliwa itp.).

W przypadku biopaliw zawierających do 85% (*V/V*) etanolu różnice pomiędzy właściwościami fizykochemicznymi i użytkowymi takich paliw względem tradycyjnych benzyn silnikowych są tak duże, że wymuszają wprowadzenie wielu istotnych zmian konstrukcyjnych i regulacyjnych w silniku, w celu dostosowania go do eksploatacji na takich paliwach (tablica 1) [3, 8].

Tablica 1. Najważniejsze różnice pomiędzy benzyną silnikową zgodną z PN-EN 228 a biopaliwem E85

| Właściwość   | Benzyna zgodna z PN-EN 228 | Biopaliwo E85 |
|--|----------------------------|---------------|
| Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]                                   | 720÷775                    | ~785          |
| Wartość opałowa [MJ/kg]  | ~43                        | ~29           |
| LOB  | 95 min                     | > 105         |
| LOM  | 85 min                     | > 90          |
| Współczynnik nadmiaru powietrza mieszanki paliwowo-powietrznej | 14,5÷14,7                  | ~9,7          |
| Ciepło odparowania [kJ/kg]                                     | 350                        | 780           |

Opisane wyżej różnice mają istotny wpływ na odmiennie właściwości użytkowo-eksploatacyjne biopaliw zawierających bioetanol, co może prowadzić do powstania niekorzystnych zjawisk i zagrożeń dla poprawności funkcjonowania i trwałości silników. Oddziaływaniom owych niekorzystnych zjawisk można w dużej mierze zapobiec lub ograniczyć ich skutki poprzez odpowiednie (fabryczne) przygotowanie silników do eksploatacji na biopaliwach. Silniki takie określane są wówczas nazwą *FlexFuel engines*.

Istotne problemy eksploatacyjne związane ze stosowaniem biopaliw zawierających bioetanol występujące w silnikach o zapłonie iskrowym (ZI) typu *FlexFuel* wynikają ze zwiększonego rozcieńczania smarowego oleju silnikowego w skrzyni korbowej poprzez przedostające się z komór spalania biopaliwo. Intensyfikacji tego zjawiska sprzyjają niektóre warunki eksploatacji pojazdu, a zwłaszcza duża częstotliwość zimnych rozruchów silnika (szczególnie w niskich temperaturach otoczenia), związana z wykorzystywaniem pojazdu na krótkich dystansach. W takich przypadkach obserwuje się do około 30% większe rozcieńczenie oleju smarowego paliwem aniżeli podczas eksploatacji pojazdu na dłuższych trasach, przy rzadszych zimnych rozruchach silnika. Jeżeli warunki eksploatacji pojazdu umożliwiają częste pełne nagrzanie silnika, następuje intensywne odparowanie paliwa (w tym bioetanolu) z oleju smarowego, co znacznie zmniejsza niebezpieczeństwo jego przyspieszonej degradacji [1].

Agresywne oddziaływanie bioetanolu zarówno na materiały konstrukcyjne silnika, jak i na smarowy olej silnikowy wynika ogólnie z ilości zawartej w nim (łatwo pochłanianej) wody, kwasów organicznych (powstających podczas procesu spalania bioetanolu w silniku) i innych zanieczyszczeń.

Dotychczasowe badania przeprowadzone przez producentów samochodów mających największe doświadczenie w konstrukcji silników typu *FlexFuel* (GM, Ford, SAAB) wskazują, że stosowanie paliwa E85 powoduje zmniejszenie szybkości przyrostu lepkości smarowego oleju silnikowego w stosunku do tej, jaka ma miejsce w przypadku zasilania silnika konwencjonalną benzyną. Można to wyjaśnić tworzeniem się mniejszej ilości reaktywnych składników procesu spalania bioetanolu w silniku

w porównaniu ze spalaniem benzyny [1]. W konsekwencji mniej reaktywne gazy spalinowe przedmuchiwane do skrzyni korbowej silnika w mniejszym stopniu wpływają na postępujące procesy starzenia (utlenianie) oleju smarowego i przyrost jego lepkości aniżeli w przypadku spalania benzyny silnikowej. Równocześnie podczas stosowania paliwa E85 zaobserwowano przyspieszoną utratę rezerwy alkalicznej, a więc zdolności oleju smarowego do neutralizacji kwaśnych produktów spalania, przejawiającą się w szybszym niż w przypadku spalania benzyn silnikowych spadku całkowitej liczby zasadowej. Koresponduje to z szybszą degradacją stosowanych w oleju dodatków detergentowych i dyspergujących. Warto podkreślić, że zdaniem niektórych producentów silników typu *FlexFuel* stanowi to podstawę do skrócenia (nawet o połowę) czasu między wymianami oleju smarowego w silniku. Zdaniem innych skrócenie takie nie jest potrzebne, ponieważ intensywność degradacji olejów smarowych podczas eksploatacji silników na biopaliwach z dużą zawartością bioetanolu jest niewiele większa w porównaniu do ich eksploatacji na benzynie [1]. Zastosowanie techniki FT-IR do analiz olejów w czasie eksploatacji pozwoliło ustalić, że duża zawartość bioetanolu w biopaliwie obniża wielkości nitratacji smarowego oleju silnikowego. W rezultacie wyniki dostępnych publikacji nie wskazują jednoznacznie, czy i w jakim zakresie bioetanol zawarty w biopaliwie stosowanym do zasilania silników ZI wpływa na jakościową i/lub ilościową destrukcję smarowego oleju silnikowego. Natomiast niemal bezspornym wydaje się fakt, że w przypadku silników typu *FlexFuel* w oleju smarowym obserwuje się podwyższony poziom metalicznych pierwiastków pochodzących ze zużycia elementów silnika [1]. Jednak zjawisko to może mieć związek nie z postępującą przyspieszoną degradacją smarowego oleju silnikowego, lecz ze zwiększeniem mocy jednostkowej, a zatem obciążenia mechanicznego par roboczych, co często charakteryzuje silniki przystosowane i eksploatowane na E85.

Podsumowując, ilość opublikowanych informacji dotyczących wpływu bioetanolu zawartego w paliwie do silników ZI na procesy destrukcji silnikowego oleju smarowego jest niewielka. Wyniki przeprowadzonych dotychczas badań w powyższym zakresie nie są jednoznaczne i spójne ze sobą, zatem wymagają dalszego potwierdzenia.

### Silnikowe stanowisko badawcze

Potencjalne zagrożenia dla silnika – oraz oleju smarowego – jakie wynikają z jego eksploatacji na benzynach etanolowych, wymagają wszechstronnych badań

w stanowiskowych testach silnikowych, a następnie potwierdzenia ich wyników w badaniach eksploatacyjnych. Przedmiotowe zagrożenia (zwłaszcza w odniesieniu do

degradacji smarowego oleju silnikowego) występują nawet w przypadku silników typu *FlexFuel*, a zatem fabrycznie przygotowanych do zasilania biopaliwami z zawartością bioetanolu do 85% (V/V).

Niestety, dotychczas nie ustanowiono znormalizowanych metod badań zjawisk związanych ze stosowaniem benzyn silnikowych zawierających w swym składzie podwyższoną względem normy PN-EN 228 ilość bio-komponentów. Jednak ze względu na to, że badania tego rodzaju są niezbędne do wiarygodnej, pełnej oceny jakości i właściwości użytkowych coraz szerzej wykorzystywanych biopaliw, ośrodki badawczo-rozwojowe stosują metody własne, tzw. *in-house*, zwłaszcza w zakresie stanowiskowych badań silnikowych.

Biorąc powyższe pod uwagę, w INiG skonstruowano uniwersalne silnikowe stanowisko badawcze, umożliwiające prowadzenie ocen wpływu benzyn zawierających w swym składzie do 85% (V/V) etanolu na ilościowe i jakościowe procesy degradacji oleju smarowego w silniku oraz osady tworzone na zaworach dolotowych, w komorach spalania, kanałach dolotowych głowicy silnika i pokrywające końcówki wylotowe wtryskiwaczy paliwa [8].

Na stanowisku badawczym zastosowano silnik Ford 1.8L Duratec-HE PFI FFV (125PS) MI4 (Euro IV), fabrycznie przystosowany do zasilania paliwami o zawartości bioetanolu od 0% do 85% (V/V) (rysunek 1).

W opracowanej procedurze badawczej przyjęto 4-fazowy, powtarzalny cykl badawczy, składający się na test silnikowy. Test taki ma odzwierciedlać przeciętne warunki pracy silnika podczas eksploatacji pojazdu w ruchu miejskim o małym natężeniu [6, 7, 10–12].

Założono, że test będzie prowadzony przez 300 godzin rzeczywistej pracy silnika, przy czym powinien on być wykonywany z przerwami (tak jak ma to miejsce w przypadku rzeczywistej eksploatacji pojazdu w mieście na długim dystansie). Ustalono zatem, że silnik będzie pra-

cował bez przerwy 16 godzin w ciągu doby, a na 8 godzin będzie zatrzymywany w celu schłodzenia – dla dalszego przybliżenia warunków pracy oleju smarowego (w tym przypadku termicznych) do takich, jakie mają miejsce w czasie rzeczywistej eksploatacji pojazdu. W związku z przyjęciem takiej formuły realizacji testu jego całkowity czas wynosił około 450 godzin. Taki czas uznano za niezbędny do wystąpienia jednoznacznej, wielokierunkowo mierzalnej degradacji oleju, biorąc jednocześnie pod uwagę konieczność ograniczenia wysokich kosztów długotrwałych testów silnikowych. Przyjęty czas prowadzenia testu wynika z doświadczeń własnych oraz firm samochodowych i ich ośrodków badawczych co do przebiegu eksploatacyjnego silników, po którym (w określonych warunkach) pojawiają się wyraźne symptomy przyspieszonej degradacji smarowego oleju silnikowego [1, 10–12]. Doświadczenia



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego z silnikiem Ford 1.8L Duratec-HE PFI FFV (125PS) MI4 [INiG]

te i obserwacje wskazują, że w przypadku miejskiej eksploatacji pojazdu z silnikiem typu *FlexFuel* przedmiotowe problemy pojawiają się po przebiegu rzędu 15÷18 tys. km, co przekłada się mniej więcej na 300 godzin pracy silnika w teście stanowiskowym.

### Założenia prowadzenia badań symulacyjnych

Celem pracy było przeprowadzenie porównawczej oceny procesów degradacji smarowego oleju silnikowego poddanego oddziaływaniu benzyny silnikowej zgodnej z normą PN-EN 228 lub jednego z dwóch paliw bioetanolowych E85 (bez i z pakietem dodatków uszlachetniających) w długotrwałych testach silnikowych.

Dobierając olej smarowy do prowadzenia badań, wzięto pod uwagę, że od kilku lat stopniowo zwiększa się liczba producentów silników samochodowych zalecających lub wręcz wymagających stosowania do swoich jednostek napędowych olejów smarujących specjalnie do nich opracowanych i zalecanych, a zatem spełniających ich

wewnętrzne normy jakościowe. Normy te obejmują własne testy badawcze, których spełnienie warunkuje dopuszczenie konkretnego oleju do stosowania w silnikach danego producenta. Wynika to z coraz częstszego stosowania w konstruowanych silnikach nietypowych rozwiązań bądź układów współpracujących z silnikiem stanowiących wyróżnik danego producenta. Duże znaczenie ma też technologia wytwarzania silników i związane z nią wymagania materiałowo-obróbkowe, w istotny sposób wpływające na dobór środka smarującego. Wyżej wymienione przyczyny sprawiają, że ze względu na zachowanie wymaganej trwałości i niezawodności silnika oraz optymalne wykorzystanie jego parametrów użytkowych konieczne jest stosowanie do jego smarowania produktu, który będzie się wyróżniał indywidualnymi właściwościami dopasowanymi do wymagań przedmiotowej jednostki napędowej [13]. Biorąc powyższe pod uwagę, do badań przyjęto smarowy olej silnikowy spełniający wewnętrzne specyfikacje firmy Ford, będącej wytwórcą silnika stosowanego do prowadzenia badań symulacyjnych. Ze względu na właściwości lepkościowe i jakościowe wybrany olej smarowy opisano jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1. Olej spełniał wymagania specyfikacji Ford WSS-M2C-913A, WSS-M2C-913B i WSS-M2C-913C, a jego właściwości fizykochemiczne zaprezentowano w tablicy 2.

*UWAGA: Niepewność wszystkich pomiarów wykonanych w Instytucie Nafty i Gazu została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie Eurachem/Citac Guide QUAM:2000.P. Podane wartości niepewności stanowią niepewność rozszerzoną przy poziomie ufności ok. 95% i współczynnika rozszerzenia  $k = 2$ .*

Jako paliwo odniesienia przyjęto popularną na polskim rynku benzynę silnikową o LOB 95, zgodną z wymaganiami normy PN-EN 228. Dwa biopaliwa etanolowe zostały skomponowane w INiG przy wykorzystaniu bezołowiowej benzyny silnikowej 95 i etanolu [4]. W przypadku jednego z biopaliw zastosowano nieuszlachetnioną benzynę silnikową 95, a w przypadku drugiego – taką samą benzynę, ale uszlachetnioną pakietem dodatków reprezentatywnym dla benzyn silnikowych powszechnie spotykanych na rynku krajowym.

Wyniki wykonanych analiz właściwości fizykochemicznych paliw stosowanych w testach silnikowych zaprezentowano w tablicach 3 i 4.

Paliwa etanolowe E85 i E85 + dodatek spełniały wymagania jakościowe podane w przytoczonym rozporządzeniu ministra gospodarki [16].

Tablica 2. Właściwości fizykochemiczne oleju silnikowego opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 oznaczone w INiG

| Oznaczana cecha; Warunki badania   | Jednostka            | Wynik badania/ niepewność               |
|--|----------------------|---|
| Lepkość kinematyczna: – w temp. 100°C  | [mm <sup>2</sup> /s] | 9,594±0,052                             |
| Wskaźnik lepkości  | –                    | 160                                     |
| Lepkość HTHS w 150°C   | [mPa · s]            | 2,77±0,08                               |
| Temperatura płynięcia  | [°C]                 | –38±4                                   |
| Liczba kwasowa   | [mg KOH/g]           | 2,47±0,14                               |
| Całkowita liczba zasadowa  | [mg KOH/g]           | 9,70±4,26                               |
| Odparowalność met. Noacka  | [% (m/m)]            | 10,5±0,6                                |
| Zawartość pierwiastków z pakietu jakościowego:<br>– wapń<br>– magnez<br>– cynk<br>– fosfor | [ppm]                | 1885±194<br>8,7±2,7<br>842±50<br>745±84 |

Tablica 3. Wyniki analizy właściwości benzyny odniesienia o LOB 95

| Parametr                     | Wyniki oznaczeń/ niepewność | Wymagania według normy PN-EN 228 |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Liczba oktanowa [RON]        | 96,3±0,5                    | min. 95,0                        |
| Liczba oktanowa [MON]        | 85,3±0,64                   | min. 85,0                        |
| Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ] | 751,7±0,2                   | 720÷775                          |
| Prężność par [kPa]           | 57,9±0,6                    | 45,0÷60,0                        |
| Destylacja:                  |                             |                                  |
| E70 [% (V/V)]                | 31,5±1,6                    | 20,0÷48,0                        |
| E100 [% (V/V)]               | 50,1±1,4                    | 46,0÷71,0                        |
| E150 [% (V/V)]               | 80,2±1,1                    | min. 75,0                        |
| Temp. końca destylacji [°C]  | 204,8±3,2                   | max. 210                         |
| Pozostałość [% (V/V)]        | 0,9                         | max. 2                           |
| Zawartość etanolu [% (V/V)]  | 4,7±0,1                     | max. 5                           |
| Zawartość benzenu [% (V/V)]  | 0,6±0,02                    | max. 1,0                         |
| Zawartość siarki [mg/kg]     | 7,1±0,9                     | max. 10                          |
| Korozja Cu [klasa korozji]   | 1                           | klasa 1                          |
| Okres indukcyjny [minuta]    | > 360                       | min. 360                         |
| Zawartość żywic [mg/100 ml]  |                             |                                  |
| – nieprzemylane              | 23,4±4,9                    | –                                |
| – obecne                     | 0,2±0,1                     | max. 5                           |
| Skład grupowy FIA [% (V/V)]  |                             |                                  |
| – parafino-nafteny           | 56,1±0,8                    | –                                |
| – olefiny                    | 12,2±0,5                    | max. 18,0                        |
| – aromaty                    | 31,7±0,5                    | max. 35,0                        |

Tablica 4. Wyniki analizy właściwości paliw etanolowych E85 [4]

| Parametr   | E85<br>Wynik/niepewność  | E85 + dodatek<br>Wynik/niepewność | Wymagania według<br>Rozporządzenia*                                |
|--|--|-----------------------------------|--|
| Badawcza liczba oktanowa [RON]   | 104,8±0,5  | –                                 | min. 95,0  |
| Motorowa liczba oktanowa [MON]   | 89,4±0,64  | –                                 | min. 85,0  |
| Zawartość siarki [mg/kg]   | < 5  | –                                 | max. 10  |
| Okres indukcyjny [minuta]  | > 360  | –                                 | min. 360   |
| Zawartość żywic nieprzemysłowych [mg/100 ml]   | 1,1±0,2  | 5,1±0,2                           | –  |
| Zawartość żywic obecnych (po przemyciu rozpuszczalnikiem) [mg/100 ml]                | 0,4±0,2  | 0,4±0,2                           | max. 5   |
| Wygląd w temperaturze otoczenia, która nie może być wyższa niż 15°C                  | czysty i jasny, wolny od zawieszonych i wytrąconych zanieczyszczeń | –                                 | czysty i jasny, wolny od zawieszonych i wytrąconych zanieczyszczeń |
| Zawartość alkoholi wyższych (C <sub>3</sub> –C <sub>8</sub> ) [% (V/V)]              | 2,4±0,21   | –                                 | max. 2,0   |
| Zawartość metanolu [% (V/V)]   | < 0,17   | –                                 | max. 1,0   |
| Zawartość eterów (z 5 lub więcej atomami węgla) [% (V/V)]                            | < 0,17   | –                                 | max. 5,2   |
| Zawartość fosforu [mg/l]   | < 0,15   | –                                 | niewykrywalny  |
| Zawartość wody [% (V/V)]   | 0,1±0,015  | –                                 | max. 0,3   |
| Zawartość nieorganicznych chlorków [mg/l]  | < 1,0  | –                                 | max. 1   |
| pHe  | 6,5±0,49   | –                                 | 6,5÷9,0  |
| Badanie działania korodującego na miedzi (3 h w temperaturze 50°C) [stopień korozji] | 1  | –                                 | 1  |
| Zawartość kwasów w przeliczeniu na kwas octowy [% (m/m)]                             | 0,001±0,001  | –                                 | max. 0,005   |
| Zawartość etanolu i alkoholi wyższych [% (V/V)]                                      | 77   | –                                 | lato: 75÷85  |
| Zawartość benzyn silnikowych [% (V/V)]   | 23   | –                                 | lato: 14÷22  |
| Prężność par [kPa]   | 41,4±1,5   | –                                 | lato: 35,0÷60,0  |
| Temperatura końca destylacji [°C]  | 170,1±3,2  | –                                 | max. 210   |
| Pozostałość po destylacji [% (V/V)]  | 2,0  | –                                 | max. 2   |
| Gęstość w 15°C [kg/m <sup>3</sup> ]  | 783±0,2  | –                                 | –  |

\* Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 22.01.2009 r. w sprawie wymagań jakościowych dla biopaliw ciekłych (Dz.U. z 2009 roku nr 18, poz. 98)

### Kryteria oceny i metody badań olejów smarowych

Monitorowanie właściwości użytkowych oleju smarowego w eksploatowanym silniku jest jednym z istotnych źródeł informacji o stanie technicznym i przebiegu eksploatacji samochodu, a jego analiza pozwala na ocenę warunków smarowania silnika. O pochodzeniu wykrytych w oleju substancji można wnioskować na podstawie informacji o bazie olejowej, pakiecie dodatków uszlachetniających, komponentach paliwa współdziałającego z olejem oraz metalach, z których wykonane zostały elementy robocze silników. Wytwarzane w procesach spalania podczas pracy silnika ciepło, kontakt z paliwem i produktami jego spalania, przy bezpośrednim oddziaływaniu tlenu z powietrza, powodują wielokierunkową degradację olejów silnikowych.

Proces degradacji oleju silnikowego to utrata jego podstawowych właściwości fizykochemicznych, które skutkiem jest, między innymi, zanieczyszczenie silnika produktami starzonego oleju, takimi jak nierozpuszczalne osady, laki, żywice, szlamy itp. Mechanizmy powstawania osadów związane są ze skomplikowanymi procesami fizykochemicznymi i różnorodnością dużej liczby nierozdzielnie ze sobą związanych i wzajemnie oddziałujących na siebie czynników. Znaczącą rolę w procesie tworzenia, a następnie wytrącania osadów olejowych na elementach silnika odgrywa jego konstrukcja, w tym budowa układów smarowania, chłodzenia i korbowo-tłokowego, sposób działania odpowietrzania skrzyni korbowej, zastosowany układ

wtrysku paliwa itp. Ważnym zagadnieniem jest możliwość występowania niekorzystnych interakcji pomiędzy pakietem dodatków uszlachetniających paliwo i olej silnikowy, co może sprzyjać procesom inicjowania i tworzenia szlamów w silniku [10]. Zatem podczas pracy oleju obserwuje się zarówno zmiany jego charakteru chemicznego, jak i towarzyszące im, szeroko rozumiane, wielopłaszczyznowe pogorszenie jego jakości. Stopniowe, wolno postępujące zmiany składu oleju smarowego są zjawiskiem normalnym, a dopiero ich skumulowanie i progresywne pogarszanie wielkości jednego lub kilku parametrów jakościowych stanowi podstawę do podejmowania zdecydowanych dzia-

łań zmierzających do przywrócenia olejowi silnikowemu wymaganych od niego funkcji (jest to zwykle wymiana oleju). Monitorowanie właściwości fizykochemicznych oleju silnikowego w okresie eksploatacji może dostarczyć cennych informacji, jednakże pod warunkiem, że procedura badań będzie prowadzona według obowiązujących metod badań. W tabelicy 5 wymieniono znormalizowane metody zalecane do badań olejów silnikowych podczas eksploatacji.

Przedstawiony zestaw metod stanowił podstawę przyjętego zakresu i sposobu badań oleju oraz kryteriów jego oceny w długotrwałych symulacyjnych testach silnikowych prowadzonych w ramach przedmiotowego projektu badawczego.

Tabela 5. Metody badań stosowane do oceny zmian właściwości fizykochemicznych oleju silnikowego podczas eksploatacji

| Lp. | Oznaczana cecha oleju silnikowego                                | Metoda badania według |
|-----|--|-----------------------|
| 1.  | Lepkość kinematyczna   | PN-EN ISO 3104        |
| 2.  | Lepkość HTHS   | PN-94/C-04098         |
| 3.  | Liczba kwasowa   | PN-88/C-04049         |
| 4.  | Całkowita liczba zasadowa  | PN-76/C-04163         |
| 5.  | Zawartość osadów nierozpuszczalnych                              | ASTM D 893            |
| 6.  | Stopień oksydacji  | ASTM E 2412 A.2       |
| 7.  | Stopień nitratacji   | ASTM E 2412 A.2       |
| 8.  | Sulfonowanie   | ASTM E 2412 A.2       |
| 9.  | Zawartość pierwiastków pochodzących ze zużycia elementów silnika | ASTM D 5185           |
| 10. | Odporność na utlenianie przebiegające w cienkiej warstwie oleju  | ASTM D 4742           |

### Wyniki badań

W ramach pracy przeprowadzono trzy niżej opisane stanowiskowe testy silnikowe, w których – postępując zgodnie z wcześniej opracowaną procedurą – symulowano procesy degradacji wytypowanego do badań oleju smarowego w silniku typu *FlexFuel* z zapłonem iskrowym. Silnik zasilano opisanymi wcześniej trzema paliwami, monitorując w czasie jego pracy procesy destrukcji oleju smarowego według wyżej podanych metod.

- Test nr I – ocena procesów degradacji oleju smarowego opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 we współdziałaniu z benzyną silnikową o LOB 95.
- Test nr II – ocena procesów degradacji oleju smarowego opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 we współdziałaniu z biopaliwem E85.
- Test nr III – ocena procesów degradacji oleju smarowego opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 we współdziałaniu z biopaliwem E85 + dodatek.

W tablicach 6, 7 i 8 przedstawiono wyniki ocen oleju smarowego otrzymane podczas wyżej wymienionych silnikowych testów symulacyjnych.

Wybrane wyniki analiz właściwości fizykochemicznych monitorowanych w eksploatacji olejów smarowych przedstawiono na rysunkach 2–6.

Podane wyniki badań (tabela 6, rysunki 2–6) wskazują, że olej silnikowy, współdziałając z benzyną odniesienia (LOB 95), utrzymał do końca okresu eksploatacji wysoki poziom właściwości użytkowych. Naturalna odporność na utlenianie bazy olejowej, wzmocniona zastosowanym w pakiecie jakościowym inhibitorem utleniania, do połowy testu (150 h) uległa bardzo niewielkiemu obniżeniu, rozpatrując ten parametr zarówno w odniesieniu do dużej objętości oleju, jak i w przypadku cienkiej warstwy. Intensywniejsze zmiany zaobserwowano w przedziale eksploatacji 250÷300 h. Świadczą o tym wyniki badań liczby kwasowej (rysunek 3), stopnia oksydacji (rysunek 4) oraz odporności na utlenianie w cienkiej warstwie metodą RBOT (rysunek 5). Zmiany potencjału myjąco-dyspergującego oleju, oceniane w oparciu o spadek liczby zasadowej, miały przebieg liniowy, a ich wielkość należy ocenić jako niewielką. Analiza wyników osadów nierozpuszczalnych

Tablica 6. Wyniki badania właściwości fizykochemicznych oleju opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 przy zasilaniu silnika benzyną o LOB 95

| Oznaczana cecha;<br>Warunki badania                           | Wynik badania / niepewność |             |             |             |             |
|---|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   | olej świeży                | po 150 h    | po 200 h    | po 250 h    | po 300 h    |
| Lepkość kinematyczna w temp. 100°C [mm <sup>2</sup> /s]       | 9,594±0,052                | 9,012±0,049 | 8,863±0,048 | 9,321±0,051 | 9,822±0,053 |
| Lepkość HTHS (150°C, 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup> , mPa·s) | 2,77±0,08                  | 2,74±0,08   | 2,79±0,08   | 2,81±0,08   | 2,83±0,08   |
| Całkowita liczba zasadowa [mg KOH/g]                          | 9,70±4,26                  | 9,51±4,26   | 9,35±4,26   | 8,79±4,26   | 8,21±4,26   |
| Liczba kwasowa [mg KOH/g]                                     | 2,47±0,14                  | 2,71±0,14   | 3,04±0,14   | 3,42±0,14   | 4,21±0,14   |
| Zawartość osadów nierozpuszczalnych [% (m/m)]                 |                            |             |             |             |             |
| – w n-pentanie  |                            | 0,02±0,07   | 0,04±0,07   | 0,09±0,07   | 0,11±0,07   |
| – w toluenie  |                            | 0,01±0,03   | 0,03±0,05   | 0,06±0,07   | 0,07±0,08   |
| Stopień oksydacji [Abs (0,1 mm)]                              | –                          | 0,04±0,008  | 0,06±0,008  | 0,08±0,008  | 0,10±0,008  |
| Stopień nitratacji [Abs (0,1 mm)]                             | –                          | 0,04±0,008  | 0,07±0,008  | 0,10±0,008  | 0,11±0,008  |
| Sulfonowanie [Abs (0,1 mm)]                                   | –                          | 0,02±0,008  | 0,04±0,008  | 0,05±0,008  | 0,06±0,008  |
| Odporność na utlenianie w cienkiej warstwie oleju [min]       | 950±273                    | 907±261     | 876±257     | 816±236     | 731±212     |
| Zawartość pierwiastków ze zużycia [ppm]:                      |                            |             |             |             |             |
| – żelazo  |                            | 4±1,1       | 7±1,8       | 10±2,0      | 14±3        |
| – glin  |                            | 2 -         | 3 -         | 4 -         | 6±4,3       |
| – miedź   |                            | 4±0,7       | 6±1,0       | 9±1,5       | 13±2,0      |
| – ołów  |                            | 3 -         | 5 -         | 8 -         | 10±5,0      |

w pentanie i toluenie wskazuje na systematyczny przyrost produktów degradacji oleju, zarówno o charakterze osadów zdyspergowanych, utrzymywanych przez olej w stanie zawieszonym, jak i osadów posiadających skłonność do wytrącania z oleju i osadzania się na elementach silnika, przy czym ich poziom do końca testu przyjmował niskie wartości. Powolny proces degradacji oleju silnikowego, zwłaszcza do 150 godziny testu, spowodował, że spadek jego lepkości w wyniku ścinania modyfikatora lepkości oraz rozcieńczenia oleju paliwem (2,8% (V/V) na koniec testu) nie był rekompensowany wzrostem lepkości wynikającym z zagęszczania oleju produktami degradacji i ze względu na niską wartość lepkości kinematycznej świeżego oleju (gwarantującą jednak klasę lepkości SAE 30) badany olej eksploatowany pomiędzy 125 a 230 godziną testu posiadał lepkość przypisaną klasie SAE 20. Lepkość dynamiczna HTHS (rysunek 6) badanego oleju podczas całego testu silnikowego nie przekraczała wartości granicznej, co gwarantowało, że olej nawet przy wysokich temperaturach i dużych szybkościach ścinania utrzymywał film smarowy, czego potwierdzeniem jest oznaczony w oleju niski poziom pierwiastków pochodzących ze zużycia elementów silnika.

W przypadku zasilania silnika biopaliwami (E85 i E85 + dodatek), porównując poziom poszczególnych właściwości oleju silnikowego (tablice 7 i 8, rysunki 2–6), jak i charakter ich zmian podczas eksploatacji, można stwierdzić, że bez

względu na stosowane w teście biopaliwo – uszlachetnione czy nie – postęp degradacji oleju silnikowego był zbliżony w każdym analizowanym przypadku. Można więc uznać, że pakiet uszlachetniający biopaliwo nie oddziaływał negatywnie na pakiet jakościowy oleju silnikowego. Obserwowano systematyczną utratę odporności na utlenianie (intensywniejszą od 150 godziny testu), ze względu na wzrost liczby kwasowej (rysunek 3), stopień oksydacji (rysunek 4) i obniżanie odporności na utlenianie w cienkiej warstwie (rysunek 5). Produkty utleniania oleju, jak również innych procesów destrukcji, zwiększały swój udział w oleju wraz ze wzrostem okresu eksploatacji, czemu towarzyszył spadek liczby zasadowej. Oznaczenia lepkości kinematycznej oleju (rysunek 2) w eksploatacji wskazują na przewagę procesu destrukcji modyfikatora lepkości i rozcieńczanie oleju paliwem w etapie do 150 godziny testu nad procesem jego zagęszczania w wyniku powstawania produktów degradacji. W okresie od 125 do 175 godziny testu olej silnikowy obniżył klasę lepkościową do SAE 20. Eksploatacja oleju silnikowego po 150 godzinie testu stanowi w warunkach wysokich temperatur i dużych szybkości ścinania zagrożenie dla utrzymania filmu smarowego na współpracujących powierzchniach. Spadkowi lepkości HTHS (rysunek 6) towarzyszy wzrost zużycia elementów silnika.

Uzyskane w ramach projektu wyniki badań wskazują, że przedmiotowy olej silnikowy do końca 300-godzinnego

Tablica 7. Wyniki badania właściwości fizykochemicznych oleju opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 przy zasilaniu silnika biopaliwem E85

| Oznaczana cecha;<br>Warunki badania                             | Wynik badania / niepewność |             |             |              |             |
|---|----------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|   | olej świeży                | po 150 h    | po 200 h    | po 250 h     | po 300 h    |
| Lepkość kinematyczna w temp. 100°C [mm <sup>2</sup> /s]         | 9,594±0,052                | 9,002±0,049 | 9,211±0,051 | 9,6645±0,053 | 10,12±0,060 |
| Lepkość HTHS (150°C, 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup> , mPa · s) | 2,77±0,08                  | 2,74±0,08   | 2,64±0,08   | 2,57±0,08    | 2,48±0,08   |
| Całkowita liczba zasadowa [mg KOH/g]                            | 9,70±4,26                  | 9,45±4,26   | 9,05±4,26   | 8,64±4,26    | 7,41±4,26   |
| Liczba kwasowa [mg KOH/g]                                       | 2,47±0,14                  | 3,01±0,14   | 3,35±0,14   | 3,97±0,14    | 4,92±0,14   |
| Zawartość osadów nierozpuszczalnych [% (m/m)]                   |                            |             |             |              |             |
| – w n-pentanie  |                            | 0,03±0,07   | 0,05±0,07   | 0,13±0,07    | 0,19±0,07   |
| – w toluenie  |                            | 0,01±0,03   | 0,03±0,05   | 0,07±0,08    | 0,10±0,11   |
| Stopień oksydacji [Abs (0,1 mm)]                                | –                          | 0,05±0,008  | 0,09±0,008  | 0,14±0,008   | 0,19±0,008  |
| Stopień nitratacji [Abs (0,1 mm)]                               | –                          | 0,07±0,008  | 0,12±0,008  | 0,15±0,008   | 0,18±0,008  |
| Sulfonowanie [Abs (0,1 mm)]                                     | –                          | 0,02±0,008  | 0,04±0,008  | 0,05±0,008   | 0,07±0,008  |
| Odporność na utlenianie w cienkiej warstwie oleju [min]         | 950±273                    | 891±360     | 857±346     | 802±325      | 724±294     |
| Zawartość pierwiastków ze zużycia [ppm]:                        |                            |             |             |              |             |
| – żelazo  |                            | 10±2,0      | 17±4,0      | 24±4,2       | 36±6,5      |
| – glin  |                            | 6±4,3       | 7±4,3       | 12±4,5       | 18±4,5      |
| – miedź   |                            | 7±1,0       | 10±2,0      | 18±2,0       | 20±2,0      |
| – ołów  |                            | 3 -         | 6 -         | 10±5,0       | 14±5,0      |

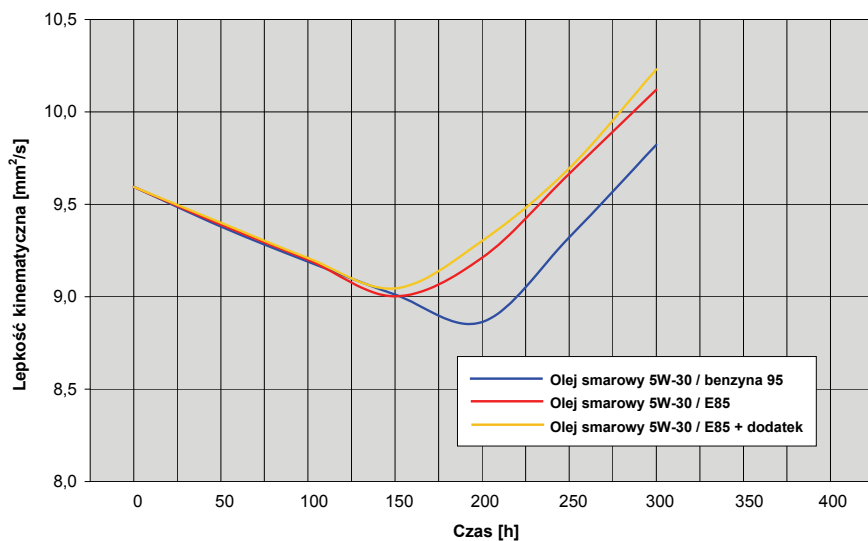
Tablica 8. Wyniki badania właściwości fizykochemicznych oleju opisanego jako 5W/30 ACEA: A-1/B-1 przy zasilaniu silnika biopaliwem E85 + dodatek

| Oznaczana cecha;<br>Warunki badania                             | Wynik badania / niepewność |             |             |             |             |
|---|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   | olej świeży                | po 150 h    | po 200 h    | po 250 h    | po 300 h    |
| Lepkość kinematyczna w temp. 100°C [mm <sup>2</sup> /s]         | 9,594±0,052                | 9,045±0,049 | 9,302±0,051 | 9,695±0,053 | 10,23±0,060 |
| Lepkość HTHS (150°C, 10 <sup>6</sup> s <sup>-1</sup> , mPa · s) | 2,77±0,08                  | 2,70±0,08   | 2,61±0,08   | 2,56±0,08   | 2,47±0,08   |
| Całkowita liczba zasadowa [mg KOH/g]                            | 9,70±4,26                  | 9,30±4,26   | 9,10±4,26   | 8,79±4,26   | 7,72±4,26   |
| Liczba kwasowa [mg KOH/g]                                       | 2,47±0,14                  | 2,88±0,14   | 3,29±0,14   | 3,82±0,14   | 4,89±0,14   |
| Zawartość osadów nierozpuszczalnych [% (m/m)]                   |                            |             |             |             |             |
| – w n-pentanie  |                            | 0,03±0,07   | 0,06±0,07   | 0,12±0,07   | 0,17±0,07   |
| – w toluenie  |                            | 0,02±0,03   | 0,04±0,05   | 0,06±0,07   | 0,10±0,11   |
| Stopień oksydacji [Abs (0,1 mm)]                                | –                          | 0,06±0,008  | 0,08±0,008  | 0,13±0,008  | 0,15±0,008  |
| Stopień nitratacji [Abs (0,1 mm)]                               | –                          | 0,07±0,008  | 0,09±0,008  | 0,14±0,008  | 0,17±0,008  |
| Sulfonowanie [Abs (0,1 mm)]                                     | –                          | 0,02±0,008  | 0,05±0,008  | 0,09±0,008  | 0,12±0,008  |
| Odporność na utlenianie w cienkiej warstwie oleju [min]         | 950±273                    | 894±360     | 863±349     | 794±322     | 745±302     |
| Zawartość pierwiastków ze zużycia [ppm]:                        |                            |             |             |             |             |
| – żelazo  |                            | 14±3,0      | 19±4,0      | 26±4,5      | 34±5        |
| – glin  |                            | 4 -         | 8±4,5       | 12±4,5      | 16±4,5      |
| – miedź   |                            | 6±1,0       | 12±2,0      | 19±2,0      | 23±2,0      |
| – ołów  |                            | 3 -         | 5 -         | 9 -         | 12±5,0      |

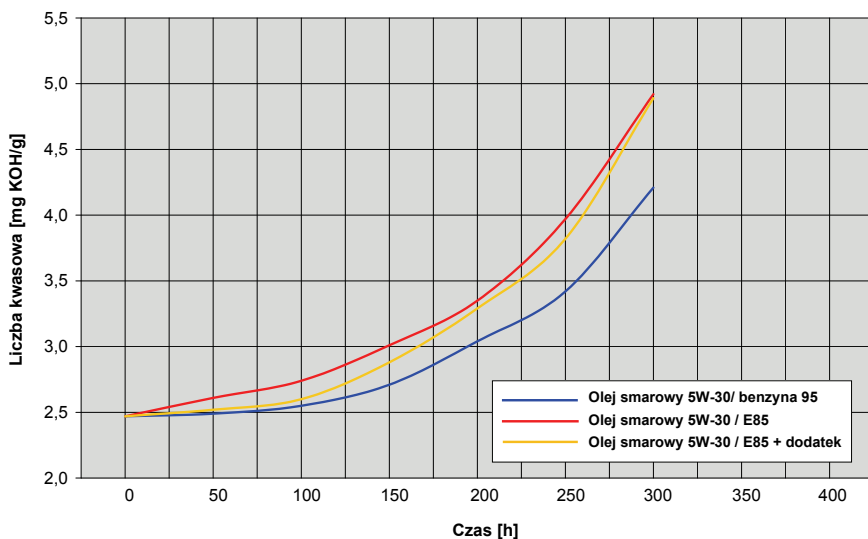
testu (odpowiadającego przebiegowi około 18 000 km) utrzymał, bez względu na stosowane paliwo, zadowalający poziom większości właściwości użytkowych. Biopaliwo z podwyższoną zawartością etanolu przyspieszyło spadek odporności oleju na utlenianie w dużej objętości,

jak również w cienkiej warstwie. W obecności biopaliwa następowało także znaczniejsze wyczerpywanie potencjału dyspergująco-detergacyjnego oleju i przyrost produktów destrukcji. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę, że w przypadku stosowania biopaliwa z etanolem odnoto-

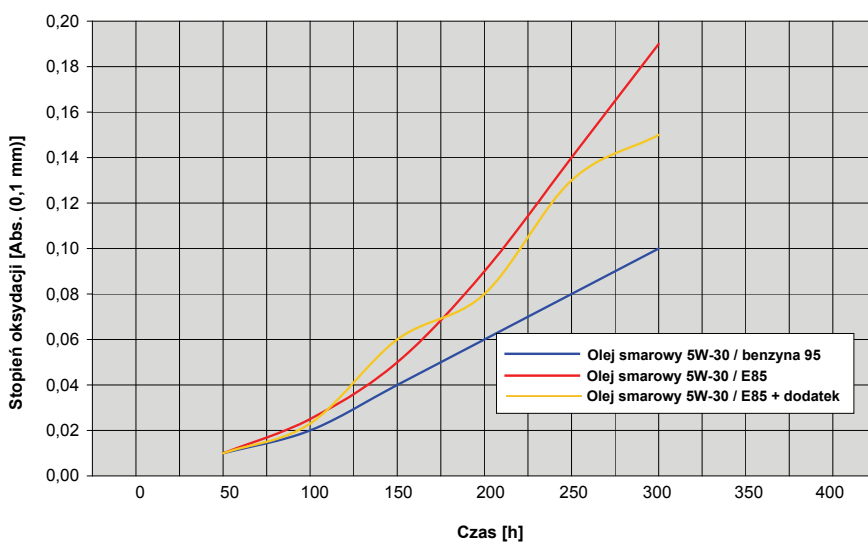




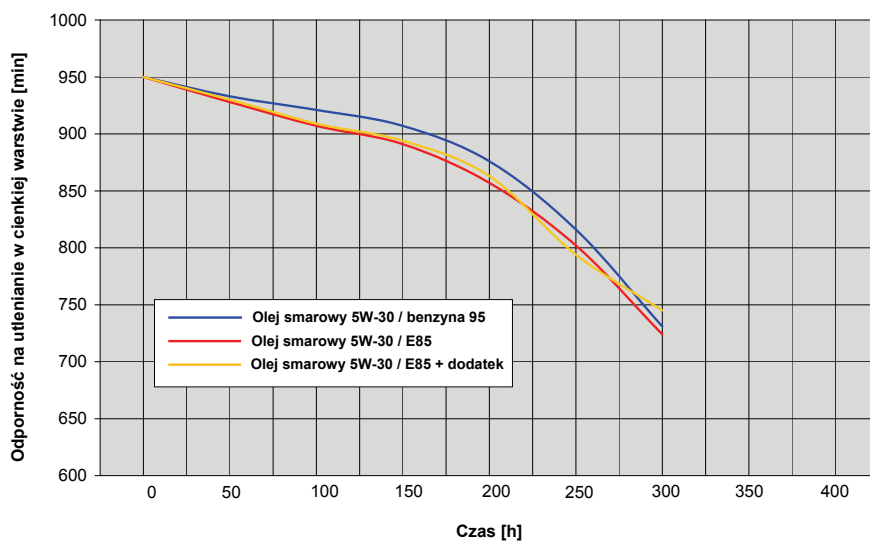
Rys. 2. Zmiany lepkości kinematycznej badanego oleju smarowego w teście silnikowym w zależności od stosowanego paliwa



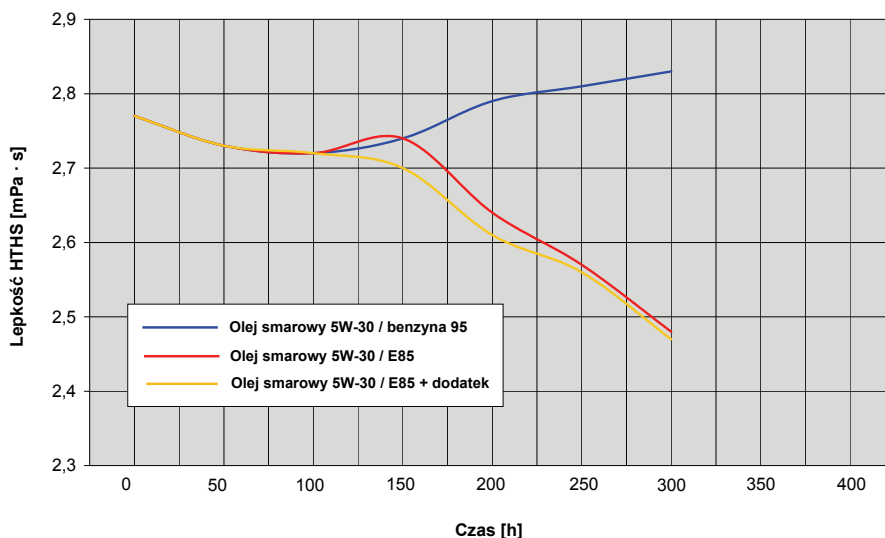
Rys. 3. Zmiany liczby kwasowej badanego oleju smarowego w teście silnikowym w zależności od stosowanego paliwa



Rys. 4. Zmiany stopnia oksydacji badanego oleju smarowego w teście silnikowym w zależności od stosowanego paliwa



Rys. 5. Zmiany odporności na utlenianie badanego oleju smarowego w cienkiej warstwie w teście silnikowym w zależności od stosowanego paliwa



Rys. 6. Zmiany lepkości HTHS badanego oleju smarowego w teście silnikowym w zależności od stosowanego paliwa

wano szczególnie wysoki wzrost osadów o charakterze zdyspergowanym, co powodowało szybsze wyczerpywanie efektywności dodatków dyspergująco-detergencyjnych. W każdym z analizowanych testów olej silnikowy podczas części testu nie utrzymywał deklarowanej klasy lepkości SAE 30. Najbardziej niekorzystnym zjawiskiem

obserwowanym w przypadku stosowania do zasilania silnika biopaliwa z etanolem jest spadek właściwości przeciwzużyciowych oleju silnikowego, spowodowany utratą lepkości przy wysokich temperaturach i dużych szybkościach ścinania, co prowadzi do czasowej utraty filmu smarowego w węzłach tarcia.

### Wnioski

1. Niezależnie od zastosowanego do zasilania silnika paliwa, olej smarowy 5W/30 ACEA: A-1/B-1 utrzymał zadowalający poziom właściwości użytkowych do końca trwania testu. Przyjęty czas prowadzenia testu odpowiadał w przybliżeniu zalecanemu czasowi między wymianami oleju.
2. Uzyskane w ramach projektu wyniki wskazują, że
3. Przeprowadzone badania dowodzą, że w przypadku w przypadku zasilania silnika biopaliwami z podwyższoną zawartością etanolu zachodzi większe prawdopodobieństwo okresowej utraty filmu smarowego. W związku z tym olej silnikowy powinien posiadać podwyższone właściwości przeciwzużyciowe lub podlegać skróconym okresom międzywymianowym.

stosowania biopaliw następuje szybszy proces degradacji oleju silnikowego, na co wskazuje większy stopień utlenienia i wyczerpywania właściwości dyspergująco-detergencyjnych.

## Literatura

- [1] Bergström K., Melin S. A., Jones C. Coleman: *The New ECOTEC Turbo BioPower Engine from GM Powertrain – Utilizing the Power of Nature's resources*. 28 Internationales Wiener Motorensymposium 2007.
- [2] Gmyrek R.: *Biopaliw czas... „3E” – Energia, ekologia, ekonomia...* „Przemysł Chemiczny” 2006, t. 85, nr 12, s. 1560–1567.
- [3] Hauet B., Grand J. G., Jouron C., Tran-Dinh C.: *E85: Impact of the fuel properties on „flex fuel” engine tuning*. 31 Internationales Wiener Motorensymposium 2010.
- [4] Pałuchowska M., Stępień Z.: *Ocena właściwości użytkowych i eksploatacyjnych biopaliwa E85*. DK-4100-62/11.
- [5] Schwahn H., Lutz U.: *Deposit Formation of Flex Fuel Engines Operated on Ethanol and Gasoline Blends*. Copyright 2011. SAE International.
- [6] Stępień Z., Urzędowska W., Roźniatowski K.: *Badanie form zużycia układów wtrysku paliwa w czasie eksploatacji silników z zapłonem samoczynnym*. DK-4101-1/08.
- [7] Stępień Z.: *Budowa uniwersalnego stanowiska oraz opracowanie procedury badawczej do kompleksowej oceny paliwowych i olejowych filtrów silnikowych ze szczególnym uwzględnieniem gromadzących się w nich osadów*. Dokumentacja ITN nr 3876/2005.
- [8] Stępień Z.: *Skonstruowanie silnikowego stanowiska badawczego do oceny benzyn silnikowych zawierających w swym składzie do 85% (V/V) etanolu*. Dokumentacja INiG nr arch.: DK-4100-108/10.
- [9] Tulauskas D.: *Motor Fuels & Engine Technology*. ASEAN-U.S. Enhanced Partnership. October 2007. Biofuels and the Automotive Industry Workshop, Bangkok.
- [10] Urzędowska W., Stępień Z., Krasodomski W.: *Monitorowanie zmian właściwości użytkowych oleju silnikowego oraz wzajemnych oddziaływań z pakietem dodatków uszlachetniających paliwo w czasie eksploatacji w silnikach autobusów MZA Warszawa*. Dokumentacja ITN nr 3930/2005.
- [11] Urzędowska W., Stępień Z.: *Badanie wpływu oleju smarującego silnik o zapłonie samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach*. Dokumentacja ITN nr 3633/2002 i 3741/2003.
- [12] Urzędowska W., Stępień Z.: *Określenie negatywnych skutków wzajemnego oddziaływania płynów eksploatacyjnych: benzyna silnikowa–olej silnikowy, z uwzględnieniem zmieniających się formułacji oleju, formułacji benzyny oraz obecności w benzynie różnych pakietów dodatków uszlachetniających*. Dokumentacja ITN nr 3630/2002.
- [13] Urzędowska W., Stępień Z.: *Porównawcze badania degradacji oleju smarowego w silniku wysokoprężnym z bezpośrednim, wysokociśnieniowym wtryskiem paliwa, zasilanym standardowym olejem napędowym lub olejem napędowym zawierającym FAME*. DK-4100-85/08.
- [14] Völkel L., Schwahn H., Schreyer P.: *Experience with Bio-Ethanol Gasoline Blends*. Bioetanoliske smjese ... ISSN 0350-350X GOMABN 46, 4, 307-334 Strucni rad/Professional paper UDK 621.434-632.5.022.3.002.64:665.733.5.035.



Mgr inż. Wiesława URZĘDOWSKA – z-ca kierownika Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych INiG w Krakowie. Specjalista w zakresie oceny właściwości użytkowych paliw i środków smarowych. Kierownik i uczestnik licznych projektów badawczych na rzecz przemysłu rafineryjnego. Autor i współautor dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.



Dr inż. Zbigniew STĘPIEŃ – kierownik Pracowni Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG w Krakowie. Specjalista m.in. w zakresie zjawisk będących wynikiem współdziałania silników z paliwami i olejami smarowymi. Kierownik i uczestnik wielu projektów badawczych. Autor i współautor opracowań, dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.